

УДК621. 891.22

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВНОЙ РАМЫ АВТОГРЕЙДЕРА

В.А. Шевченко, доцент, к.т.н., А.А. Резников, ассистент, ХНАДУ

Аннотация. Представлена динамическая модель формирования напряженно-деформированного состояния металлоконструкции основной рамы автогрейдера. Установлены закономерности изменения напряжений, действующих в основной раме автогрейдера, в зависимости от угла установки основного отвала в плане, и скорости движения машины.

Ключевые слова: автогрейдер, динамическая модель, металлоконструкция, основная рама, напряжения.

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОСНОВНОЇ РАМИ АВТОГРЕЙДЕРА

В.О. Шевченко, доцент, к.т.н., О.О. Резніков, ассистент, ХНАДУ

Анотація. Представлено динамічну модель формування напружено-деформованого стану металоконструкції основної рами автогрейдера. Встановлено закономірності зміння напружень, що діють в основній рамі автогрейдера, залежно від кута встановлення основного відвалу у плані, та швидкості руху машини.

Ключові слова: автогрейдер, динамічна модель, металоконструкція, основна рама, напруження.

A DYNAMIC MODEL OF FORMING THE STRAIN-STRESS STATE OF MOTOR GRADER MAINFRAMES

**V. Shevchenko, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences,
A. Reznikov, teaching assistant, KhNAHU**

Abstract. A dynamic model of forming the strain-stress state of the motor-grader main-frame metal structure has been presented. Dependences between stress variation, taking place in the motor grader mainframe, and the setting angle of the main blade in plan and motor grader speed have been ascertained.

Key words: motor grader, dynamic model, metal structure, mainframe, stresses.

Введение

Несущая металлоконструкция землеройно-транспортной машины (ЗТМ), в частности автогрейдера, является одним из наиболее нагруженных элементов машины. Режим формирования внешней нагрузки в процессе выполнения рабочих операций автогрейдера характеризуется ярко выраженной асимметричностью, случайным изменением абсолютного значения внешних сил, приложен-

ных к основному отвалу автогрейдера, с наложением на этот процесс динамических нагрузок ударного характера. Результатом такого воздействия является появление и последующее развитие усталостных трещин в наиболее нагруженных зонах основной рамы.

Необходимость исследования причин образования трещин и оценка прочностных параметров металлоконструкции ставит задачу анализа динамического напряженно-

деформированного состояния (НДС) основной рамы автогрейдера.

Анализ публикаций

Современные подходы к оценке НДС несущей металлоконструкции ЗТМ базируются на следующей методике [1]. На основе анализа расчетных положений машин определяется наихудшая комбинация максимальных рабочих нагрузок, действующих на машину. Далее, на основании методов сопротивления материалов и строительной механики, выполняется прочностный расчет. При этом внешние нагрузки, несмотря на то, что они и изменяются в процессе выполнения рабочих операций, в расчетах представляются как статические. Учет случайных составляющих формирования внешних нагрузок позволяет перейти к расчетам на долговечность [2].

Конструктивная сложность металлоконструкции основной рамы автогрейдера приводит к необходимости использования для оценки НДС методов конечных элементов. Все перечисленные подходы основаны на представлении внешних рабочих нагрузок в виде статических. При этом не учитывается тот факт, что реальная переменная нагрузка приводит к постоянному изменению НДС на каждом участке несущей металлоконструкции. Поиск эксперименты показывают, что на формирование внутренних усилий оказывают влияние и упруго-инерционные показатели самой металлоконструкции, что не учитывается в современных методиках.

Цель и постановка задачи

Целью работы является обоснование расчетной схемы и разработка математической модели формирования НДС основной рамы автогрейдера, учитывающей распределенные упругие и инерционные показатели самой металлоконструкции.

Решение задачи

При разработке расчетной схемы основной рамы автогрейдера было принято решение моделировать ее на основе стержневых схем, которые сохраняют возможность уточнения НДС в местах резкого изменения конструктивной формы (стыков стержневых элементов) с помощью коэффициентов concentra-

ции напряжения. Основополагающими при формировании расчетной модели являются стержневая схема и представление связей с грунтом в виде линейных и нелинейных упругих элементов (рис. 1).

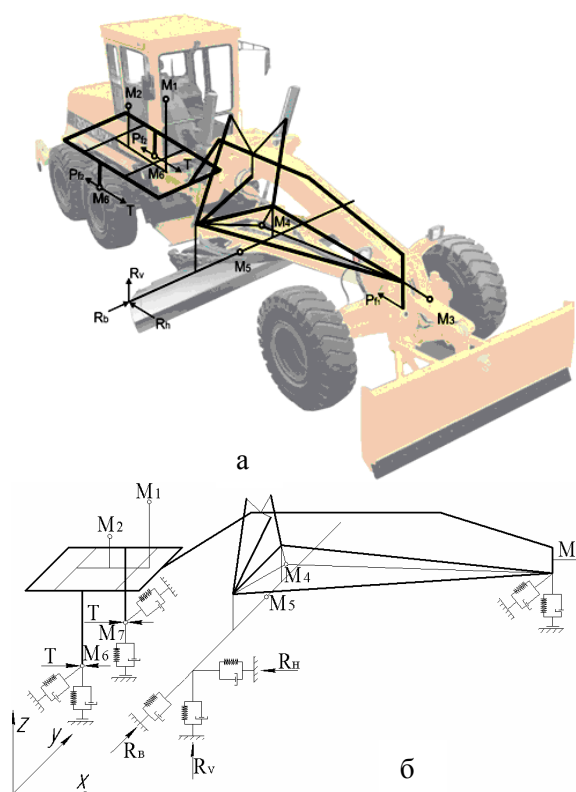


Рис. 1. Упруго-массовая модель автогрейдера (а) и расчетная динамическая схема несущей рамы (б)

При построении расчетной модели приняты следующие допущения и упрощения:

- упругие звенья рамы и подвесного оборудования, к числу которых относятся элементы трубчатого (замкнутого) профиля хребтовой части рамы и элементы подmotorной рамы, элементы подвески основного отвала (гидроцилиндры) и элементы тяговой рамы, представлены в виде стержней, обладающих распределенными упругими и массовыми параметрами;
- массивные, объемные элементы, в частности проушина крепления гидроцилиндров подвески основного отвала, поворотный круг, основной отвал, а также крепление бульдозерного отвала и сам бульдозерный отвал, считаем жесткими и недеформируемыми;
- массовые характеристики представлены погонными распределенными массами по упругим стержням и сосредоточенными массами для объемных, жестких элементов (дви-

гатель, коробка передач, кабина, бортовые балансиры с колесами, поворотный круг, основной отвал, передний мост с передними колесами и бульдозерный отвал). Сосредоточенные массы характеризуются: суммарной массой и моментами инерции относительно главных осей;

– сосредоточенные массы помещаются в центрах их тяжести, для чего вводятся безмассовые жесткие стержни (на рис. 1, б показаны тонкими линиями).

Тяговое усилие T и составляющие сопротивления копания R_H, R_V, R_B моделируются согласно общепринятым подходам. Предложенная схема позволяет учитывать не только продольное перемещение машины во время разработки грунта, но и возможность увода в поперечном направлении из-за асимметричного приложения внешних рабочих сопротивлений.

Для составления динамической модели используются уравнения Лагранжа второго рода, отражающие динамическое состояние системы в обобщенных координатах, которые распространяются на случай распределенных внутренних сил. Это правомерно, так как уравнения Лагранжа отражают общий принцип Лагранжа – Даламбера, справедливый для произвольных динамических систем. Уравнения Лагранжа записываются в виде

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j, \quad (1)$$

где q_j, \dot{q}_j – обобщенные координаты и скорости; T – кинетическая энергия; Q_j – обобщенные силы.

При построении математической модели применяется метод конечных элементов, согласно которому перемещения (координаты), а соответственно скорости и ускорения точек (масс) системы с распределенными параметрами, выражаются через узловые параметры конечных элементов.

Согласно принятым гипотез рама рассматривается как стержневая система (с дополнительными точечными массами), поэтому в качестве конечного элемента принят стержневой элемент, в узлах которого вводится вектор узловых параметров, относящихся к глобальной системе координат x, y, z

$$q_j \{U_{jx}, U_{jy}, U_{jz}, \Theta_{jx}, \Theta_{jy}, \Theta_{jz}\}, \quad (2)$$

где U_{jx}, U_{jy}, U_{jz} – линейные перемещения j -го узла; $\Theta_{jx}, \Theta_{jy}, \Theta_{jz}$ – угловые перемещения (углы поворота вокруг соответствующих осей), которые считаются малыми, что в большинстве практических случаев работы автогрейдера является приемлемым.

Обобщенные силы Q_j , соответствующие узловым параметрам q_j , имеют составляющие, относящиеся к внешним активным силам, реакциям связей и внутренним силам. К внешним силам относим весовую нагрузку, силу тяги и силы сопротивления копания. Силы упругости и демпфирования со стороны пневматических шин можно рассматривать как внутренние, включив сосредоточенные элементы упругости и демпфирования в общую динамическую систему. Внутренние силы представлены упругими силами, связанными с деформированием рамы, а также распределенными силами внутреннего трения.

Анализ кинетической энергии системы позволяет после перегруппировки выражений получить систему дифференциальных уравнений движения основной рамы автогрейдера в матричном виде

$$\begin{aligned} [M] \cdot \ddot{\Phi} + [C] \cdot \dot{\Phi} + [K] \cdot \Phi &= \\ = P_g + T \cdot (\Phi) + Q_r \cdot (q_r, \Phi) + P_f, \end{aligned} \quad (3)$$

где $[M]$ – матрица масс всей системы; $[C]$ – матрица демпфирования; $[K]$ – матрица жесткости системы; P_g – весовая нагрузка; P_f – силы сопротивления качению на колесах автогрейдера; Q_r – силы резания.

Составленная динамическая модель позволяет описывать движение машины в глобальных координатах и одновременно учитывает деформацию ее металлоконструкции, что в полной мере соответствует реальным процессам.

Система уравнений (3) представляет собой математическую модель расчета динамической нагруженности основной рамы автогрейдера при выполнении рабочих операций. Уравнения (3) дополняются начальными условиями, условиями движения и работы ав-

тогрейdera, включая конкретизированные зависимости для сил тяги $T(\phi)$ и сопротивления копанию грунта.

Интегрирование по времени уравнений (3) возможно только численными методами. Учитывая большой порядок матриц жесткости, масс и демпфирования ($10^2 - 10^3$), целесообразно применять для интегрирования конечно-разностную схему Ньюмарка, успешно используемую в задачах колебаний деформируемых тел большой размерности. Схема Ньюмарка получена в предположении постоянного ускорения в пределах временного шага, является неявной безусловно устойчивой схемой второго порядка; при этом требуется выполнение уравнений (3) в конце временного шага $t + \Delta t$. Последовательность вычислений по методу Ньюмарка состоит в следующем. Формируется эффективная матрица жесткости, определяемая выражением

$$\hat{K} = K + a_0 M + a_1 C, \quad (4)$$

где $a_0 = \alpha^{-1} \Delta t^2$, $a_1 = \delta \alpha^{-1} \Delta t$ и $\delta = 0,5$; $\alpha = 0,25$.

Учитывая симметричность матриц $[K]$, $[M]$, $[C]$, выполняется факторизация матрицы \hat{K} - разложение ее на треугольные матрицы согласно LDL^T -алгоритму

$$\hat{K} = LDL^T, \quad (5)$$

где L - верхняя треугольная матрица; D - диагональная матрица.

Матрицы K , M , C являются положительно определенными, поэтому LDL^T -алгоритм может быть заменен более простым методом квадратного корня, то есть $D=E$, где E - единичная матрица.

Результаты расчета динамических напряжений, действующих в стержнях расчетной схемы металлоконструкции основной рамы автогрейdera (рис. 2), показывают, что динамические напряжения достигают максимальных значений в зоне крепления поворотного узла гидроцилиндров подъема-опускания основного отвала, в зоне изгиба хребтовой балки и в передней части лонжеронов подмоторной рамы. Следует отметить, что именно в этих зонах наблюдается ускоренный процесс усталостного трещинообразования при эксплуатации автогрейдеров среднего класса.

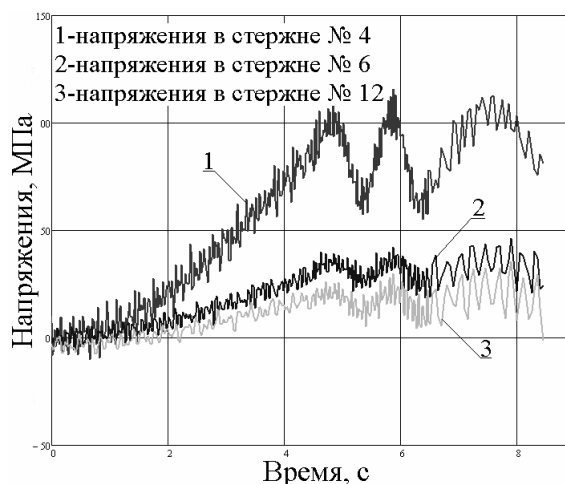


Рис. 2. Расчетные динамические напряжения: 1-зона крепления поворотного узла гидроцилиндров подъема-опускания основного отвала; 2-зона изгиба хребтовой балки; 3-передняя часть лонжеронов подмоторной рамы

На основе серии вариантных расчетных исследований были получены закономерности изменения динамической нагруженности автогрейdera при интенсивном зарезании краем отвала, в зависимости от начальной скорости движения машины (рис. 3) и угла установки отвала в плане (рис. 4).



Рис. 3. Влияние начальной скорости движения автогрейdera на нормальные напряжения: 1-зона крепления поворотного узла гидроцилиндров подъема-опускания основного отвала; 2-зона изгиба хребтовой балки; 3-передняя часть лонжеронов подмоторной рамы

Следует отметить, что при увеличении начальной скорости движения автогрейdera от 0,6 м/с до 1,6 м/с максимальные нормальные напряжения, действующие в металлоконструкции основной рамы автогрейdera, увеличиваются в 1,5-2 раза.

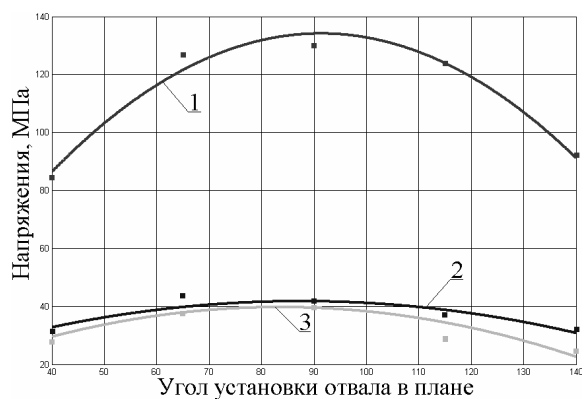


Рис. 4. Влияние угла установки отвала в плане на нормальные напряжения: 1 – зона крепления поворотного узла гидроцилиндров подъема-опускания основного отвала; 2 – зона изгиба хребтовой балки; 3 – передняя часть лонжеронов подмоторной рамы

На основании анализа приведенных данных (рис. 4) можно утверждать, что изменение угла установки отвала в плане от 40° до 90° приводит к росту максимальных нормальных напряжений в 1,8–2 раза.

Выводы

Результаты математического моделирования динамических процессов нагружения металлоконструкции основной рамы автогрейдера среднего класса позволяют сделать следующие выводы.

1. Расчетная схема и математическая модель динамических процессов нагружения металлоконструкции основной рамы автогрейдера впервые построены на основе трехмерной модели с учетом распределенных параметров металлоконструкции. Это позволило получить новые закономерности формирования нагруженности металлоконструкции основной рамы автогрейдера при резании в грунт всем отвалом и краем отвала.

2. Параметры рабочего процесса, такие как угол захвата основного отвала и начальная скорость машины, оказывают существенное влияние на формирование НДС основной рамы автогрейдера.

Литература

1. Федоров Д.И. Надежность металлоконструкций землеройных машин. Методы оценки и расчета. / Д.И. Федоров, Б.А. Бондарович, В.И. Перепонов. – М.: Машиностроение, 1971. – 216 с.
2. Ничке В.В. Надежность прицепного и навесного оборудования тракторов / В.В. Ничке. – Х.: Вища школа, 1985. – 152 с.

Рецензент: Л.А. Хмара, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 21 мая 2012 г.